

河床下切对闸坝泄洪消能的破坏及对策

李艳富, 韩昌海, 杨宇

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 河床下切导致的闸坝下游水位降低, 上下游水位差增大, 造成原有消能工不能满足消能要求, 甚至大洪水时发生严重破坏。小埠东橡胶坝工程采用一、二级消力池联合消能工设计, 由于下游河道连续多年采砂超量, 河床急剧下切, 导致消能工多次毁坏, 严重危及闸坝安全且带来巨大损失。通过水力学模型模拟了小埠东枢纽消能工消能效果, 分析了破坏原因。结合多个消能工优化方案的消能试验, 提出的推荐方案一、二级消力池均能产生稳定的水跃, 满足校核洪水消能要求。通过变动枢纽下游水位的消能试验, 研究了消能工推荐方案下游河道允许下切极限。工程实际应用表明, 推荐的消能工结构遭遇大洪水时未发生破坏, 研究提出的因河床下切造成的消能破坏加固理念和对策可为类似工程借鉴参考。

关键词: 河床下切; 消能工; 二级消能; 消能试验; 允许河床下切极限

中图分类号: TV653

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)06-0058-07

闸坝拦蓄及超量采砂等活动造成河流泥沙大量减少, 导致江河中下游段及沿海地区河床普遍下切^[1-2]。河床下切导致闸坝下游水位降低, 上下游水位差增大, 当超过安全值, 消能工无法满足消能要求时^[3-4], 应及时采取工程措施避免造成破坏^[5]。当河床水位下降后, 根据下切原因以及工程特征采取相应的消能工改造方案^[6-12]。小埠东枢纽建成蓄水后, 人为超量采挖河床砂现象严重, 造成河床连续多年急剧下切, 消能工多次毁坏又多次加固。反复地加固和破坏过程不仅危及拦河闸坝的安全, 而且带来巨大的经济损失, 迫切需从根本上改造和加固消能设施。本文结合小埠东枢纽水力学模型试验, 研究了消能工破坏原因及加固对策, 为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

小埠东橡胶坝拦河枢纽工程坝长 1 135 m, 是世界上最长的橡胶坝工程。主体工程包括橡胶坝 16 节、东西两岸调节闸各 5 孔, 东西引水闸以及东西两岸泵站及桥头堡。橡胶坝下游消能工采用二级消能结构, 由一级、二级消力池及其中间斜坡连接段组成。设计正常蓄水位 65.5 m。坝址控制流域面积 10 287 km², 河床比降约 1/2 000。设计洪水标准为 50 年一遇, 设计流量 16 000 m³/s; 校核洪水标准为 100 年一遇, 校核流量为 19 000 m³/s。

工程于 1997 年建成蓄水, 运行至 2008 年期间经历多次洪水考验, 消能设施发生 5 次毁坏并 5 次加固。2009 年 2 月第 5 次消能工加固后, 一级消力池长 9 m, 底高程 60.30 m, 二级消力池长 15 m, 底高程 56.5 m。一、二级消力池相距 26 m, 通过一级消力池下游平台、1:4 的斜坡段和二级消力池上游平台连接, 其中一级消力池下游平台长 6 m, 顶高程 61.2 m, 二级消力池下游平台长 6 m, 顶高程 58.3 m, 结构尺寸见图 1。2009 年汛期先后经历 7 月过坝洪水 5 640 m³/s 和 8 月过坝洪水 3 120 m³/s 后, 橡胶坝一级消力池下游加固部分发生严重毁坏, 下游平台最上层部分基本呈现整体漂移破坏, 平台下游斜坡段发生裂缝和冲毁状况, 见图 2 和 3。

收稿日期: 2014-06-10

作者简介: 李艳富(1983-), 女, 黑龙江鹤岗人, 工程师, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: yfli@nhri.cn

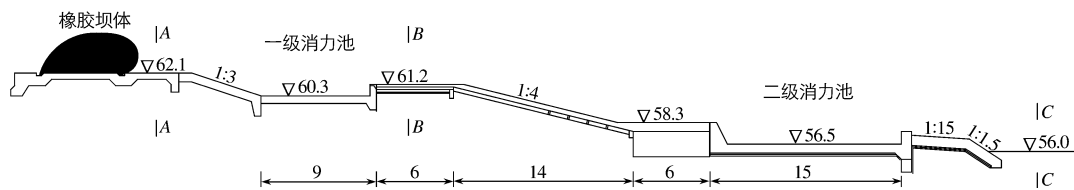


图1 2009年第5次加固消能工断面布置(单位:m)

Fig. 1 Section of flood releasing structure after the fifth reinforcement in 2009 (unit: m)

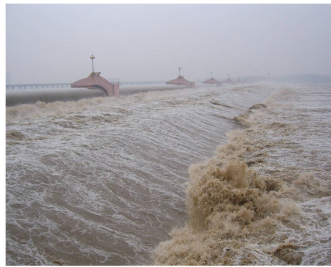


图2 汛期橡胶坝泄流下游破坏流态

Fig. 2 Discharge flow in the downstream of rubber dam during flood season



图3 一级消力池下游破坏情况

Fig. 3 Destruction of the first step stilling pool

2 消能工毁坏原因分析

根据工程资料和现场勘察,坝下消能工毁坏主要有2方面原因:

(1)下游河床超量采砂,河床连续多年急剧下切,造成上下游水头差增大,消能工已不再满足消能要求。1996年施工时河床平均高程为61.0 m,2005年河床平均高程仅约为57.5 m,河床下降了3.5 m,并且河床还有继续下降的趋势,导致水位差增大,消能防冲设施不再满足消能要求。

(2)2009年加固处理未从根本上解决问题。主要表现在:①坝下呈现复杂多变的流态,二级消能机理复杂,又由于缺乏统一的二级消能设计标准或规范要求,一旦消能工布置型式及尺寸未能满足消能要求即导致消能工破坏。②加固结构强度不足。二级消能格局对两级消力池及连接段平台、斜坡段结构强度要求较高,一旦强度不足,止水不到位,必然导致加固混凝土整块被掀起,甚至产生整体漂移破坏。

3 消能方案试验研究

3.1 模型设计

采用比尺为1:40的正态模型,满足重力相似准则。试验模拟范围充分反映一跨完整橡胶坝和两侧相邻橡胶坝的主体部分及消能工布置,下游河床具有足够的冲刷和防护试验段,以保证上下游水流相似性。模型上游安装量水堰测量控制枢纽流量,采用标准测针读取上下游水位,精度为0.1 mm,误差为 ± 0.05 mm。采用南京水利科学研究院自行研制的光电式旋桨流速仪测量流速,起动流速为1 cm/s,仪器型号LS-II、精度为0.01 cm/s,误差为 ± 0.01 cm/s。

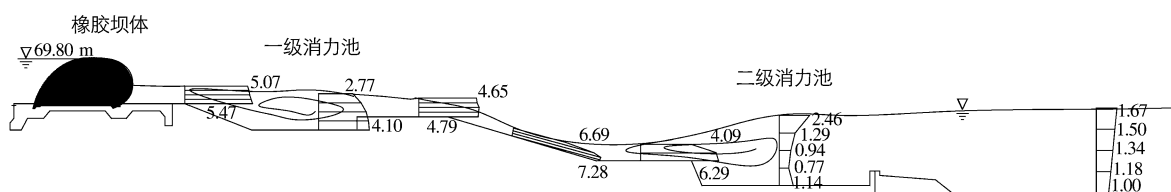
3.2 2009年第5次加固方案的消能试验

模型模拟了2009年第5次消能工加固方案。结合工程洪水标准以及2009年橡胶坝运行水文数据确定试验工况,从2 627 m³/s到校核洪水19 000 m³/s的7个试验工况见表1。通过模型试验观测了水流流态,各级洪水条件下实测水流条件见表1,流量为8 000 m³/s时的流速分布见图4。试验结果表明,各级洪水条件下,一级消力池和二级消力池内均形成稳定水跃,跃首在斜坡段,随着流量和下游水位升高,水跃跃首逐渐上移。但在小流量2 627 m³/s时水流以挑流的形式流入二级消力池,未能形成二级水跃消能。

表1 原方案实测水流条件参数

Tab.1 The measured flow parameters of every flow condition

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	一级消力池		平台		斜坡		二级消力池	下游河道
	底流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	底流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	时均压强/ m	底流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	时均压强/ m	底流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	底流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	底流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2 627	1.65	3.33	0.48 ~ 1.40	5.26	0.16 ~ 0.52	0.74	0.85	
3 410	2.13	3.57	0.52 ~ 1.48	5.45	0.24 ~ 0.56	0.88	0.62	
4 500	2.98	4.03	0.64 ~ 1.56	6.39	0.40 ~ 0.96	0.45	0.76	
8 000	4.10	4.79	1.00 ~ 1.84	7.28	0.72 ~ 1.12	1.14	1.00	
12 000	4.73	4.81	1.36 ~ 2.24	6.73	1.12 ~ 2.52	0.78	1.37	
16 000	4.96	5.22	1.28 ~ 3.12	5.17	1.72 ~ 5.60	1.00	1.35	
19 000	5.42	5.48	1.64 ~ 3.44	6.55	1.84 ~ 5.96	1.34	1.51	

图4 流量为 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的二级消力池内流速分布(单位:m/s)Fig.4 Flow velocity distribution in the downstream of rubber dam having discharge of $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (unit: m/s)

两级消力池连接段平台及斜坡段水流为急流状态,平台上流速较大,流量为 $4\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时流速约为 4.1 m/s ,流量为 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时流速达到 4.8 m/s 左右。最大流速发生在一、二级消力池之间的斜坡段,流量为 $4\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时流速约为 6.4 m/s ,流量为 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时流速则达到 7.3 m/s 左右,最小压强值为 0.16 m 水柱。

采用 $C-C$ 断面地面高程 56.0 m 为基准面(如图1)计算一、二级消力池消能率。其中,根据 $A-A$ 断面和 $B-B$ 断面的水流条件参数计算一级消力池消能率,即总水头之差占 $A-A$ 断面总水头的比例。根据 $B-B$ 断面和 $C-C$ 断面的水流条件参数计算二级消力池消能率,即总水头之差占 $B-B$ 断面总水头的比例。各断面水流条件以及一、二级消能率计算结果见表2。可见,一级消力池消能率过低,仅为 10% 左右,导致出池流速较高,一级消力池下游平台和斜坡段为急流。

表2 原方案消力池消能率

Tab.2 Energy dissipation rate of every step of stilling pool

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	断面 $A-A$ 水流条件 (相对基准面高差 6.1 m)			断面 $B-B$ 水流条件 (相对基准面高差 5.2 m)			断面 $C-C$ 水流条件 (相对基准面高差 0 m)			一级 消能 率/ %	二级 消能 率/ %
	静水头/ m	流速水头/ m	总水头/ m	静水头/ m	流速水头/ m	总水头/ m	静水头/ m	流速水头/ m	总水头/ m		
	2 627	6.98	0.67	7.65	6.20	0.57	6.77	4.60	0.04		
3 410	7.10	0.77	7.87	6.24	0.69	6.93	5.00	0.03	5.03	11.98	27.36
4 500	7.30	0.95	8.25	6.48	0.85	7.33	5.81	0.04	5.85	11.18	20.23
8 000	7.70	1.41	9.11	7.20	1.16	8.36	6.00	0.09	6.09	8.26	27.14
12 000	8.10	1.56	9.66	7.60	1.22	8.82	6.92	0.11	7.03	8.74	20.30
16 000	8.66	2.08	10.74	8.32	1.63	9.95	7.68	0.12	7.80	7.34	21.61
19 000	8.90	2.64	11.54	8.40	1.98	10.38	8.20	0.16	8.36	10.08	19.42

可见,在二级消能工结构中,各级洪水上下游水位差为 $3.54 \sim 5.00\text{ m}$,一级消力池和二级消力池内底流速均较小,而两级消力池连接段平台和斜坡段的流速大,是加固的重点部位。一旦加固结构不合理、强度不

足或止水不足,水流流入缝隙即可产生较大的扬压力,从而导致结构毁坏。这可以解释工程实际运行中一级消力池下游加固部分易发生严重毁坏的状况。

此外,当下游河床持续下切,上下游水位差逐渐增大,一级消力池消能有限,导致急流区流速增大,仍威胁消能工安全。小流量条件下二级消力池无法形成水跃消能,加速下游河道冲刷下切。因此,本文考虑优化工程消能工结构与尺寸,从水流机理上改善消能工屡修屡毁现状。

3.3 优化加固方案确定

考虑一级消力池的安全直接关系大坝安全,而二级消力池消能效果较好,因此,一、二级消力池的结构和尺寸保持不变。连接段平台和斜坡流速大,是发生破坏的主要部位,拟通过优化连接段布置改善消能工底流消能效果。

方案1:取消连接段平台(顶高程61.2 m),并缩短斜坡段,改为消力池布置,形成了三级消能布置方案。试验表明,当泄流量达到8 000 m³/s及以上,下游水位顶托作用不足,导致一级消力池内不能形成水跃,所以该方案不能成立,仍应选择二级消能方式。

方案2:保持原方案连接段平台(顶高程61.2 m)不变,取消二级消力池前平台(顶高程58.3 m),将一、二级斜坡段坡度1:4改为1:7,直接与二级消力池前端齿坎顶端相连。试验表明,与原方案类似,小流量时水流以挑流的形式流入二级消力池,未能形成二级水跃消能。该方案不成立。

方案3:延长原方案连接段平台(顶高程61.2 m)长度3.6 m,顶高程降低0.2 m为61.0 m;取消二级消力池前端平台(顶高程58.3 m)和齿坎,将连接段1:4斜坡直接与二级消力池底板(高程56.5 m)相接。试验表明,各级洪水条件下,水流进入二级消力池后主流贴近池底,在二级消力池内形成稳定水跃消能结构,符合底流消能规律。而一级消力池在流量小于16 000 m³/s时形成稳定水跃,流量增大后就不能产生水跃消能。

方案4:在方案3的基础上,连接段平台(顶高程61.0 m)末端增设一道坎,经过多个方案试验论证,最终取为高0.6 m、宽0.5 m的小坎。试验表明,各级洪水条件下,一、二级消力池均形成良好的消能水跃。该方案是较为理想的消能工布置方案之一。

方案5:延长原方案连接段平台(顶高程61.2 m)长度2.08 m,顶高程增高0.2 m为61.4 m;取消二级消力池前端平台(顶高程58.3 m)和齿坎,将连接段1:4斜坡直接与二级消力池底板(高程56.5 m)相接。试验表明,各级洪水条件下,一、二级消力池均形成稳定水跃,具有良好的底流消能效果(见图5)。该方案是较为理想的消能工布置方案之一。

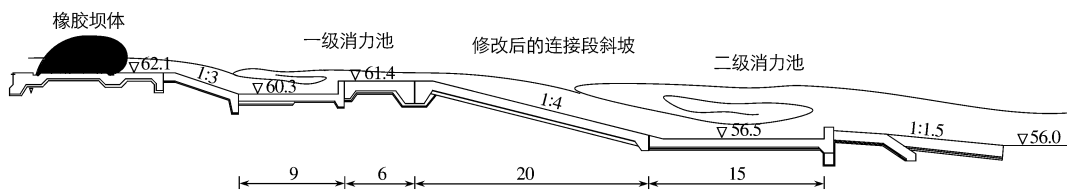


图5 优化加固方案5的消能工断面布置(单位:m)

Fig. 5 Section of flood releasing structure of the fifth optimized reinforcement scheme (unit: m)

对比5种消能工优化方案,连接段平台(顶高程61.2 m)和斜坡布置直接影响一级消力池内流态,当平台高程降低或斜坡变缓均导致大流量时一级消力池内不形成水跃,而方案4平台设小坎和方案5平台增高均保证一级消力池内形成稳定消能水跃,在保证二级消力池内仍有良好流态的前提下发挥最大的消能效果。

二级消力池前端平台(顶高程58.3 m)和齿坎直接影响二级消力池内流态,原方案、方案1和方案2中保留平台和齿坎均导致小流量时水流挑流进入二级消力池,甚至在二级消力池内不形成水跃,方案4和方案5中去掉平台和齿坎均保证二级消力池内形成稳定消能水跃,水流进入二级消力池后主流贴近池底,符合底流消能规律。

因此,推荐方案4和方案5作为优化加固方案。同时建议加大加固连接段平台和斜坡段强度,且止水和排水设施齐全。在运行中加强观测,控制下游河道水位下切,并特别关注可能产生的裂缝、止排水效果和板块间缝隙的防渗和止水问题,确保工程长期运行安全。

小埠东橡胶坝下游消能工实际采用了方案5,经过2010年加固实施后,在2012年遭遇 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上洪水未产生破坏,说明应对策略正确,扭转了消能工屡修屡坏的局面,达到了预期目的。

4 下游河床下切控制

下游河床由砂砾组成,中值粒径约为 1.3 mm ,工程运行中易发生冲蚀下切。在下游水位持续下降过程中,二级消力池下游会产生明显的水跌或二次水跃,甚至不能形成水跃,水流将以挑流的形式流入下游河道,这将会对下游河道产生严重冲刷,进而危及消能工安全。

试验观测了因下游水位下降,推荐消能工结构二级消力池内产生明显水跌或二次水跃的下游临界水位,试验结果见表3。在 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上流量情况下,下游水位降到一定程度,二级消力池不再产生水跃,水流以挑流的方式流入下游河道(见图6),将对下游造成严重冲刷并危及消能工的安全。下游河道河床下切的允许值随流量的增大而增大(表3),为了满足各级洪水条件下推荐消能工对下游水位的要求,下游河道下切的极限不宜超过 1.0 m 。

此外,动床试验表明,下游河床铺设粒径为 13 mm 的砾石即可达到保护砂砾河床的作用,在 $4\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 以下,下游河道无明显冲刷;在 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上,冲深也显著减小。因此在工程中,建议采用废旧混凝土石料进行下游防护以取得较好的防护效果。

表3 各级洪水下游极限水位和河床极限下切深度

Tab.3 Downstream limit water level and limit riverbed incision depth under flood conditions

流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	正常水位 / m	临界水位 / m	河床下切深度 / m	挑出水位 / m
2 627	60.05	58.98	1.07	-
3 410	60.21	59.17	1.02	-
4 500	60.94	59.57	1.17	-
8 000	61.69	60.46	1.23	59.69
12 000	62.68	60.82	1.86	60.53
16 000	63.51	61.47	2.04	61.20
19 000	64.04	62.02	2.02	61.49

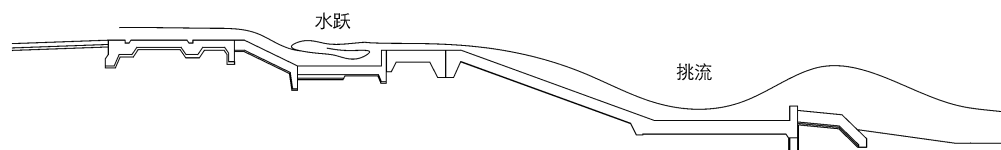


图6 超过水位下切极限后水流以挑流方式流入下游河道

Fig.6 Discharging flow into the downstream channel in the form of ski-jump

5 结 语

闸坝下游河床下切导致水位降低,原有消能工不满足消能要求,危及工程安全。本文以小埠东橡胶坝二级消力池联合消能工为例研究了应对策略,并在实际应用中取得了预期效果,得出以下几点结论:

(1)一、二级消力池连接段平台和斜坡为急流区,是加固的重点部位。建议增大加固强度,且止水和排水设施齐全。

(2)当一级消力池尾部平台高程降低或斜坡变缓时,大流量条件下一级消力池内不形成水跃,但在平台设小坎或平台增高后,一级消力池内形成稳定消能水跃,在保证二级消力池内仍有良好流态的前提下发挥最

大的消能作用。

(3) 二级消力池前端平台和齿坎导致小流量水流挑流进入二级消力池,不形成水跃,当去掉平台和齿坎后,主流贴近池底并形成稳定水跃,符合底流消能规律。

(4) 本工程河床下切不宜超过 1.0 m,建议采用废旧混凝土石料对下游河床进行防护。

参 考 文 献:

- [1] 毛野,黄才安. 采砂对河床变形影响的试验研究[J]. 水利学报, 2004(5): 64-69. (MAO Ye, HUANG Cai-an. Experimental study on effect of sand mining on riverbed deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(5): 64-69. (in Chinese))
- [2] 陈进,黄薇. 梯级水库对长江水沙过程及环境影响初探[C]//中国水利学会学术年会论文集——节水型社会建设的理论与实践, 2005. (CHEN Jin, HUANG Wei. Impact of multi-reservoirs on the Yangtze River water and sediment process and environment[C]//China Institute of Water Resources Academic Proceedings—Theory and Practice for the Construction of Water-Saving Society, 2005. (in Chinese))
- [3] 胡明. 低水头、大单宽流量泄洪消能形式试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 158-162. (HU Ming. Experiment study on energy dissipation form of low head large unit discharge flood discharge[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(5): 158-162. (in Chinese))
- [4] 朱三华,韩江,月永昌,等. 东江河床下切对黄大仙河段水位的影响分析[J]. 人民珠江, 2010, 31(增1): 17-19. (ZHU San-hua, HAN Jiang, YUE Yong-cang, et al. Dongjiang River incision impact on the water level of Huangdaxian river reach[J]. Pearl River, 2010, 31(Suppl1): 17-19. (in Chinese))
- [5] 黄智敏,陈卓英,罗岸,等. 若干拦河闸下游河道水位降低的消能问题[J]. 中国农村水利水电, 2009(8): 83-86, 90. (HUANG Zhi-min, CHEN Zhuo-ying, LUO An, et al. Research on energy dissipation of several barrages with downstream river water-level degradating and their rebuilding[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(8): 83-86, 90. (in Chinese))
- [6] 赖瑞山. 潮州供水枢纽拦河水闸消能工改造设计[J]. 吉林水利, 2007(11): 3-7. (LAI Rui-shan. The sluice energy dissipation structure reconstruction design in Chaozhou water supply complex[J]. Jilin Water Resources, 2007(11): 3-7. (in Chinese))
- [7] 边境. 和盛橡胶坝维修加固工程中的二级消能工设计初探[J]. 吉林水利, 2007(9): 20-22. (BIAN Jing. Discussion on the second class dispersion and diffusion works in Hesheng rubber dam project reinforced[J]. Jilin Water Resources, 2007(9): 20-22. (in Chinese))
- [8] 张从联,黄智敏,江涓. 青溪水电站大坝下游河床冲刷分析与研究[J]. 广东水利水电, 2005(3): 1-4. (ZHANG Cong-lian, HUANG Zhi-min, JIANG Wei. Dam downstream river bed scour analysis and research of Qingxi hydropower station[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2005(3): 1-4. (in Chinese))
- [9] 黄智敏,陈卓英,钟勇明,等. 流溪河李溪拦河闸的消能问题及改造研究[J]. 广东水利水电, 2009(3): 3-6. (HUANG Zhi-min, CHEN Zuo-ying, ZHONG Yong-ming, et al. Study on the energy dissipation problems and transformation of Liuxi River Lixi's sluice[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2009(3): 3-6. (in Chinese))
- [10] 陈卓英,黄智敏,钟勇明. 潮安县官塘桥闸除险加固工程水工模型试验研究[J]. 广东水利水电, 2009(5): 15-16. (CHEN Zuo-ying, HUANG Zhi-min, ZHONG Yong-ming. Study on the hydraulic model test of reinforcement engineering of Guantang Chaoan bridge and gate project[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2009(5): 15-16. (in Chinese))
- [11] 黄智敏,陈卓英,朱红华,等. 低水头拦河闸下游一、二级消力池的布置[J]. 水利水电科技进展, 2013(6): 33-36. (HUANG Zhi-min, CHEN Zhuo-ying, ZHU Hong-hua, et al. Layout of primary and secondary stilling basin downstream low head barrage[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013(6): 33-36. (in Chinese))
- [12] 黄智敏,钟勇明,何小惠. 惠州东江水利枢纽工程拦河闸泄洪运行研究[J]. 水利水电工程设计, 2012, 31(1): 47-50. (HUANG Zhi-min, ZHONG Yong-ming, HE Xiao-hui. Research on flood discharging operation of Huizhou Dongjiang water-control project dam[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 47-50. (in Chinese))

Riverbed incision damagable to hydraulic structure and its countermeasures

LI Yan-fu, HAN Chang-hai, YANG Yu

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Riverbed incision at the downstream of the dam would induce fall in water level and water level fluctuation. As a result, the original energy dissipater of the dam can not be able to dissipate water power completely. Rising water power will destroy the energy dissipation structure. An energy dissipation structure having two steps is used in the Xiaobudong rubber dam. Due to excessive sand mining, the riverbed was sharply incised for successive years, the energy dissipation structure was thus destructed. The structure was reinforced many times, but during a heavy flood the energy dissipation structure between the first stilling pool and the second still pool was destroyed around the whole dam line, which brought huge economic losses and threat to the Xiaobudong rubber dam. In this study, based on hydraulic experiments, the failure of the energy dissipator of the Xiaobudong dam is analyzed. The connection section between the first and second energy dissipaters has been re-designed, and as a result, in the first and second stilling basins, stable hydraulic jump, is formed, and the energy dissipator is found in good condition. Besides, the limit depth of riverbed incision is also studied. After reinforcement measures are actually implemented, the energy dissipator of the dam is able to dissipate the water power completely, and the energy dissipation structure suffers no damage again. The ideas and measures of the reinforcement in this study can provide a reference for other energy dissipaters facing the similar threat caused by riverbed incision.

Key words: riverbed incision; energy dissipation structure; energy dissipater having two steps; hydraulic experiment for energy dissipation; limit riverbed incision depth